

# 절리암반내 지하수 유동해석을 위한 대표체적법, 비대표체적법 및 절리망 해석법의 비교 연구

A Comparative Study on the REV, non-REV and Joint Network  
Methods for Analysis of Groundwater Flow in Jointed Rock Masses

문 현 구\*  
Moon, Hyun-Koo

---

## Abstract

The three methods of analysis (i) REV(representative elemental volume), (ii) non-REV and (iii) joint network analysis are introduced in this paper to analyze the groundwater flow in jointed rock mass and the inflow into underground excavations. The results from those methods are compared one another to reveal their characteristics by varying the number of joints and the diameter of the opening. The pre-processor, the so-called sequential analysis, is introduced to predict the equivalent hydraulic conductivity of a jointed rock mass having a number of intersecting joints. Using the finite element mesh, joint map and sequential analysis, the equivalent hydraulic conductivities are calculated for all 445 elements. The hydraulic inhomogeneity and the determination of the representative properties of jointed rock masses are discussed.

In the REV analysis where the entire rock mass is homogenized through the representative properties, the inflow is increased regularly and consistently by increasing the joint density, the opening size and the conductivity contrast value. Though the non-REV analysis showed irregular variation of the inflow due to the local inhomogeneity allowed to individual elements, the inflow approached the REV results as the characteristic length increases. The joint network analysis showed the most sensitive reaction to the joint density, the opening size and the presence of the network crossing the opening. The reliability of the network analysis depends on the geometric data of individual joints. In view of the limited field data on joint geometry and possible uncertainty the REV and non-REV methods are considered more practical and rational than the joint network analysis.

---

\* 정희원, 한양대학교 공과대학 시스템응용공학부 교수

## 요 지

본 논문에서는 절리암반에서 발생하는 지하수 유동과 굴착된 지하공동으로의 지하수 유입량을 해석하는 대표체적법, 비대표체적법 및 절리망 해석법을 소개하고 절리의 수와 공동의 직경을 변화시키면서 각 해석법의 특징과 결과를 비교하였다. 선처리 과정으로서 다수의 절리가 서로 교차하는 절리암반의 등가 수리전도계수를 산정하는 이론과 계산 과정(일명, 순차적 해석)이 소개되었다. 유한요소망과 절리도 및 순차적 해석을 이용하여 445개 요소 각각의 등가 수리전도계수를 계산하였으며 절리암반의 비균질 수리전도성과 대표물성 결정에 관해 논의하였다.

대표체적법에서는 대표물성을 통해 절리암반의 균질화가 이루어졌으며 따라서 절리밀도, 공동의 직경 및 수리전도대비의 증가에 따른 지하수 유입량의 증가도 규칙적이며 일관성 있는 경향을 보였다. 비대표체적법에서는 암반의 비균질성이 요소 단위로 해석에 반영됨으로써 유입량의 변화 양상은 불규칙하였으나 특성 치수가 증가함에 따라 대표체적법의 결과에 접근하는 경향을 보였다. 절리망 해석은 절리밀도, 공동크기 및 절리망과 공동의 교차 여부 등에 가장 민감하게 반응하였으나 해석결과와 신뢰도가 개별 절리에 관한 자료에 너무 의존하게 되는 단점이 있다. 제한된 범위에서 수집될 수밖에 없는 현장 절리자료의 불확실성을 감안할 때 대표체적법과 비대표체적법이 실질적으로 더 합리적인 해석방법으로 인식되었다.

**Keywords :** Representative elemental volume, Equivalent hydraulic conductivity, Jointed rock mass, Non-representative elemental volume, Groundwater inflow, Joint network, Sequential analysis.

## 1. 서 론

지하공동 굴착시 발생하는 암반지하수의 유동과 공동 내부로의 지하수 용출은 굴착공정을 어렵게 하고 구조물 자체의 유지 관리 및 안전성을 위협하는 주된 요인의 하나로 인식되고 있다. 일반적으로 현장에서 관찰되는 암반에는 절리, 층리, 단층, 파쇄대 등 연약면들이 다수 분포하며 이들은 암반의 변형을 용이하게 하고 강도를 저하시킬 뿐만 아니라 암반의 수리전도성을 높임으로써 지하수의 유동을 원활케 한다. RMR-시스템이나 Q-시스템과 같은 암반분류법에서는 이러한 연약면들의 표면 상태와 간극 및 공간적 분포 상태를 암반평가에 반영하고 있기 때문에 평가점수는 암반의 변형성과 강도특성에도 밀접한 관련성을 갖고 있다. 실제로 RMR값은 암반의 변형계수(in-

situ deformability)와 전단강도 매개변수(shear strength parameters)를 대략적으로 추정하는데 사용되고 있다. 따라서 RMR값을 통해 얻어진 암반의 변형계수(EM)와 전단강도 매개변수( $c$ ,  $\phi$  값)는 실질적으로 해당 암반의 대표물성치(representative property)의 역할을 하고 있으며 이는 암반을 하나의 거대한 균질 등방체로 간주하는 것을 의미하기도 한다.

공학적 규모의 구조물로서 터널과 사면을 다룰 때 관심의 초점은 굴착면에 인접한 암반의 거동이다. 이는 굴착면에서 응력과 변형 및 변형률의 집중현상이 일어나고 안전성을 저해하는 비탄성적(inelastic) 제반 거동이 시작되는 위치가 바로 굴착면 부근이기 때문이다. 또한 지하수 유동의 측면에서는 굴착면과 교차하는 유로(flow path)의 분포 상태에 따라 공동내부로의 침투유량이 크게

달라질 수 있어 공동 주변의 암반 상태는 더욱 중요시된다. 따라서 유한요소법에 의한 응력해석 또는 유동해석시 공동 주변에 매우 조밀한 요소망을 설정하고 외곽경계에 가까울수록 요소의 크기를 증가시킴으로써(mesh gradation) 분석코자 하는 물리량(응력, 변위, 유량, 유속 등)의 변화 양상에 적절히 대응하는 요소망을 설정하는 것이 상례이다(Grabinsky & Curran, 1993). 이렇게 할 경우 절리암반에 굴착된 공동의 주변에는 절리가 내포된 요소들과 그렇지 않은 요소들이 있을 수 있으며 이는 요소망에 비균질성을 제공한다.

다음 단계는 발생된 각각의 요소에 필요한 물성을 지정하는 과정으로서 절리암반의 경우 다음 세 가지 방법을 생각할 수 있다. (1)RMR로부터 얻어진 암반의 대표물성치를 모든 요소에 일률적으로 지정하는 방법. (2)절리의 역학적 성질과 공간적 분포 상태(절리도)를 이용하여 전체 암반의 등가물성(equivalent properties)을 구하고 이를 모든 요소에 지정하는 방법. (3)유한요소망과 절리도를 중첩시킨 후 절리가 내포된 요소들에 대해서는 각 요소마다 개별적으로 등가물성을 구하고 이를 그 요소의 물성으로 지정하는 방법.

방법(1)은 절리의 공간적 분포 상태가 등방성과 균질성을 만족시킬 수 있는 몇몇 특별한 경우 즉, 절리의 방향성과 위치가 무작위적이며(random distribution) 절리의 수가 통계적인 의미를 가질 정도로 충분히 많을 경우(heavily jointed)에 가능하다. 절리들 또는 절리군들이 뚜렷한 방향성을 보이거나 지역적으로 편중된 분포 양상을 보일 경우, 암반은 비균질 이방체의 특성을 갖게 되고 따라서 암반등급을 통해 추정된 물성치는 대표치의 의미를 상실하게 된다. 방법(2)는 해석 영역으로 설정된 절리암반의 등가물성이 가질 수 있는 이방성을 허용하는 반면 절리의 분포 위치와 국부적인 편중 등에 기인한 요소망의 비균질성은 고려하지 않는다. 방법(3)은 해석 영역내의 모든 요소에 대

해 내포된 절리의 분포 상태를 파악해야 하고 개개 요소의 등가물성을 결정해야 하는 어려움은 있으나 암반의 이방성과 비균질성을 모두 해석에 반영할 수 있는 방법이다.

따라서 본 연구에서는 방법(2)와 방법(3)을 이용하여 절리암반에 굴착된 공동에서의 지하수 침투유량을 분석하고 비교하여 보았다. 방법(2)는 본질상 Hudson(1989)이 제시한 대표체적(REV: representative elemental volume)의 개념에 기초하고 있기에 “REV해석”이라 명명하며, 방법(3)은 Pariseau(1994)가 제안한 비대표체적(NRVE : non-representative volume element)의 개념과 상통하기에 본 논문에서 “non-REV해석”이라 명명하였다. 한편 이 두가지 해석과는 별개로 개별 절리들을 지하수의 주요 유로(preferential flow path)로 간주하고 암반에 분포하는 절리들 중 연결된 절리만으로 구성된 절리망(joint network)을 통해 유동해석을 수행하였다.

## 2. 등가 수리전도계수 산정법

수리전도계수는 Darcy의 법칙을 표현한 다음 식에서 수두구배와 유동속도를 연결하는 역할을 한다.

$$\{v_i\} = -[k_{ij}] \{h, j\} \quad (1)$$

여기서 아래첨자 i와 j는 좌표계 (1, 2, 3)을 나타내며,  $\{v_i\}$ 는 유동속도벡터 또는 비유량(specific discharge)벡터,  $[k_{ij}]$ 는 (3×3) 수리전도계수행렬,  $\{h, j\}$ 는 수두구배벡터이다. 직교이방성(orthotropic) 매질의 경우 좌우변의 벡터량은 각각 이방성의 축(1, 2, 3)을 따라 3개 성분으로 구성되며 수리전도계수행렬도 3개의 대각선 성분( $k_{11}$ ,  $k_{22}$ ,  $k_{33}$ )으로 구성된다. 일반적으로 수리전도계수행렬은 9개 성분으로 구성되지만 대칭성을 가정하여 6개

성분으로 표현한다. 사용자가 설정한 좌표축(x, y, z)이 이방성의 축과 일치하지 않을 경우 수리전도 계수 행렬은 다음과 같이 2차 텐서의 좌표축 변환 방식을 따라 원하는 좌표계로 전환할 수 있다.

$$[k]_{(x, y, z)} = [T][k]_{(1, 2, 3)}[T]^T \quad (2)$$

여기서,  $[k]_{(x, y, z)}$ 는 (x, y, z)좌표계에서의 수리 전도계수행렬,  $[k]_{(1, 2, 3)}$ 는 (1, 2, 3)좌표계에서의 수리전도계수행렬,  $[T]$ 는 (x, y, z)축과 (1, 2, 3)축이 이루는 각도의 방향여현들로 구성된 좌표변환 행렬,  $[T]^T$ 는  $[T]$ 의 전치행렬이다. 만일 z-축과 3-축이 일치하고, x, y축이 1, 2축과 각도  $\theta$ 를 이루는 2차원 문제의 경우 수리전도계수는 다음과 같이 표현된다.

$$k_{xx} = \frac{k_{11} + k_{22}}{2} + \frac{k_{11} - k_{22}}{2} \cos 2\theta + k_{12} \sin 2\theta \quad (3-1)$$

$$k_{yy} = \frac{k_{11} + k_{22}}{2} - \frac{k_{11} - k_{22}}{2} \cos 2\theta - k_{12} \sin 2\theta \quad (3-2)$$

$$k_{xy} = -\frac{k_{11} - k_{22}}{2} \sin 2\theta + k_{12} \cos 2\theta \quad (3-3)$$

$$k_{yx} = k_{xy} \quad (3-4)$$

절리암반의 등가 수리전도계수(equivalent hydraulic conductivities)를 결정하는 과정은 우선 하나의 수평 절리를 내포하고 있는 가장 단순한 형태의 모델에 대한 분석으로부터 시작된다. 이 모델은 절리와 신선암으로 구성된 2상 복합체(two-phase composite body)로서 절리와 평행한 방향의 수리전도계수는 신선암보다는 절리의 수리전도성에 의해 좌우되며 절리에 수직인 방향으로 신선암의 수리전도성이 주된 영향을 미치게 된다. 즉, 절리에 수직인 방향으로 유량(또는 유

속)의 평형조건에 의해 절리와 신선암에 동일한 유량이 발생하며, 절리에 평행한 방향으로 수리 구배가 동일하더라도 절리와 신선암의 유량이 달라진다. 이 개념을 이론식으로 표현하면 절리와 신선암 각각의 상(phase)에 대해 다음과 같은 유동방정식이 성립된다.

$$\begin{Bmatrix} v_1 + \Delta v_1^{(p)} \\ v_2 \\ v_3 + \Delta v_3^{(p)} \end{Bmatrix} = - [k^{(p)}] \begin{Bmatrix} h_{,1} \\ h_{,2} + \Delta h_{,2}^{(p)} \\ h_{,3} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

여기서 아래첨자 1과 3은 절리면에 평행한 좌표축, 2는 절리에 수직인 좌표축을 나타내며, 위첨자 (p)는 절리(joint phase) 또는 신선암(intact rock phase)을 의미하고  $v_1, v_2, v_3$ 은 각 축방향으로의 평균유동속도,  $h_{,1}, h_{,2}, h_{,3}$ 은 각 방향으로의 평균수리구배,  $\Delta v_1^{(p)}$ 와  $\Delta v_3^{(p)}$ 는 절리 또는 신선암에서 1축과 3축 방향의 유동속도 편차,  $\Delta h_{,2}^{(p)}$ 는 절리 또는 신선암에서 2축 방향의 수리구배 편차,  $[k^{(p)}]$ 는 절리 또는 신선암의 (3×3) 수리전도계수행렬이다.

평균수리구배와 평균유동속도를 연결시키는 등가 수리전도계수를 구하려면 식(4)에서 미지수항으로 나타난 세개의 편차량  $\Delta v_1^{(p)}, \Delta v_3^{(p)}, \Delta h_{,2}^{(p)}$ 를 소거하는 과정이 필요하며, 이는 “편차량의 체적가중평균(volume weighted average)은 0”이라는 다음 세가지 조건식에 의해 해결된다.

$$\begin{aligned} \sum_p f^{(p)} \Delta v_1^{(p)} &= 0, \\ \sum_p f^{(p)} \Delta v_3^{(p)} &= 0, \\ \sum_p f^{(p)} \Delta h_{,2}^{(p)} &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $f^{(p)}$ 는 절리 또는 신선암의 체적분율(volume fraction)이며  $\sum$ 는 절리와 신선암으로 구성된 복합체 전체에 대한 합산을 의미한다. 식(4)와 식(5)를 이용하여 편차량을 소거하고 순수

하게 평균유동속도와 평균수리구배 간의 관계식을 유도함으로써 등가 수리전도계수를 구할 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$k_{22}^* = \frac{1}{\sum_p \frac{f^{(p)}}{k_{22}^{(p)}}} \quad (6-1)$$

$$k_{21}^* = \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{12}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) k_{21}^* \quad (6-2)$$

$$k_{11}^* = \sum_p f^{(p)} k_{11}^{(p)} + \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{12}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) k_{21}^* - \left( \sum_p \frac{f^{(p)} (k_{12}^{(p)})^2}{k_{22}^{(p)}} \right) \quad (6-3)$$

$$k_{12}^* = k_{21}^* \quad (6-4)$$

$$k_{23}^* = \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{23}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) k_{23}^* \quad (6-5)$$

$$k_{33}^* = \sum_p f^{(p)} k_{33}^{(p)} + \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{23}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) k_{23}^* - \left( \sum_p \frac{f^{(p)} (k_{23}^{(p)})^2}{k_{22}^{(p)}} \right) \quad (6-6)$$

$$k_{13}^* = \sum_p f^{(p)} k_{13}^{(p)} + \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{12}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) k_{23}^* - \left( \sum_p \frac{f^{(p)} k_{12}^{(p)} k_{23}^{(p)}}{k_{22}^{(p)}} \right) \quad (6-7)$$

$$k_{31}^* = k_{13}^* \quad (6-8)$$

$$k_{32}^* = k_{23}^* \quad (6-9)$$

2차원 문제에서는 식(6-1)~식(6-4)에 의해 등가 수리전도계수행렬이 구성되며 3차원 문제의 경우 위의 9개 식 모두가 필요하다. 경사진 절리가 있을 경우 2차원 등가 수리전도계수행렬은 식(3)의 좌표변환에 의해 결정된다. 다수의 절리가 서로 교차할 경우에는 절리 하나 하나에 대해 식(6)을 적용하는 과정과 식(3)을 통한 좌표변환 과정을 반복적으로 수행함으로써 최종 원하는 절리암반의 형태가 되도록 한다. 이와 같은 일련의 반복 과정(이하 '순차적 해석'으로 명명함)을 수행하는

데 필요한 입력자료는 각 절리들 간의 교차각, 신선암의 체적분율과 수리전도계수, 절리의 체적분율과 수리전도계수 등이다. 절리암반의 등가물성을 예측하는 이 순차적 해석(sequential analysis)은 암반의 등가 탄성계수행렬과 등가 열전도계수행렬을 계산하는데 적용된 바 있다(Moon & Kim, 1993; 문현구와 주광수, 1991).

식(6-2), 식(6-5), 식(6-7)은 등가 수리전도계수행렬의 비대각선 성분(off-diagonal term)으로서 수리구배와 유동속도 간의 커플링(coupling) 효과를 반영한다. 일반적으로 신선암과 절리를 각각 분리해서 보면 커플링 효과는 무시할 수 있다. 이 경우  $k_{12}^{(p)}$ ,  $k_{23}^{(p)}$ ,  $k_{13}^{(p)}$ 는 모두 영(0)이고  $k_{21}^*$ ,  $k_{23}^*$ ,  $k_{13}^*$  역시 모두 영이 된다. 즉, 절리가 하나만 있을 경우에는 커플링 효과는 나타나지 않는다. 그러나 두개 이상의 경사진 절리들이 서로 교차하며 분포할 경우에는 전체 유동에 커플링 효과가 나타나게 된다. 즉, 어느 한 방향(예로, 수평방향)의 수리구배에 의해서 다른 방향(수직방향)의 유동속도성분이 발생할 수 있다. 따라서 순차적 해석과정중 두번째 절리가 최초의 절리를 교차하는 단계부터는 등가 수리전도계수행렬의 비대각선 성분들이 영이 아닌 값을 갖게 된다. 다수의 절리가 교차할 경우 커플링 수리전도계수에 관해서는 다음의 REV 및 non-REV해석에서 다시 논의되었다.

### 3. REV해석과 non-REV해석

본 유동해석에 사용된 암반은 3개의 절리군(평균경사각은 각각 34°, 76°, 65°; 평균경사방향은 각각 303°, 107°, 157°; 방향성에 대한 표준편차는 공히 5°)에 속한 절리들이 반구정상분포(Arnold's hemispherical normal distribution)를 따르며 절리의 길이는 로그정상분포(평균값은 3개 절리군 공히 50m, 표준편차는 각각 1.28m, 0.77m, 0.38m)를 따른다고 가정하였다. 해석 영역은 N50°E 방

향에서 바라본 한변 500m인 정방형 수직단면으로 하였다. 각 절리군에 속한 절리의 수는 균등하게 배분하였으나 절리밀도에 변화를 주기 위해 전체 절리의 수는 600, 900, 1200, 1500, 1800개로 증가시켰으며 절리의 간극(mechanical aperture)은 1mm로 가정하였다. 이렇게 500m × 500m 크기의 5개 절리암반 모델을 설정한 후 모델의 중앙에 원형공동이 위치한다고 가정하였다. 굴착된 원형 공동의 크기가 유동에 미치는 영향을 비교하기 위해 공동의 직경은 10m, 30m, 50m의 3가지로 변화시켜 보았다. 본 REV 및 non-REV 해석에서는 모델의 상부경계를 지표면과 지하수위의 위치로 간주하였고, 좌우측 및 하부 경계면은 수두경계조건을 사용하였고, 굴착경계에는 대기압이 작용한다고 가정하였다.

그림 1은 1200개의 절리가 분포하는 암반모델에 직경 30m의 공동이 굴착되었을 경우 유동해석을 위해 발생시킨 유한요소망과 절리암반 모델을 중첩시켜 본 그림이다. 이 요소망은 556개의 요소와 304개의 절점으로 구성되었으며 굴착경계면에

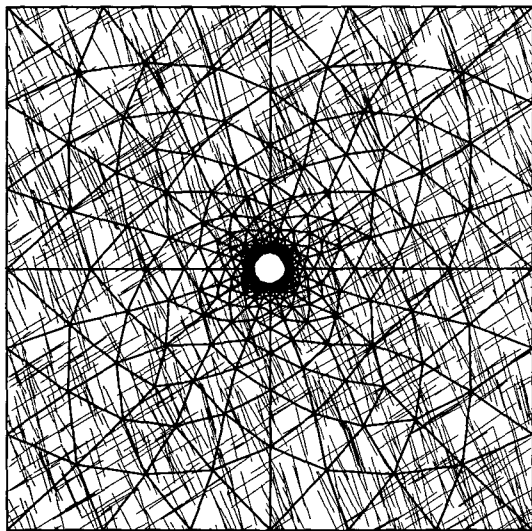


그림 1. 500m×500m 절리암반에 설정된 유동해석 유한요소망 (절리의 수=1200개, 공동의 직경=30m)

인접한 가장 작은 요소는 2.4m<sup>2</sup>, 외곽경계 부근의 가장 큰 요소는 3002m<sup>2</sup>의 크기를 갖고 있다. 이들 요소 중 최소한 하나 이상의 절리를 내포하고 있는 요소(이하 “암반요소”로 명명함)는 전체의 80%인 445개에 달한다.

그림 2는 445개 암반요소 각각에 대해 앞 절의 순차적 해석법을 적용하여 x축(수평)방향의 등가 수리전도도계수( $k_{xx}$ )를 계산하고 이를 신선암의 수리전도도계수( $k_r$ )로 정규화시킨 결과이다. 신선암의 수리전도도계수는 10<sup>-8</sup> m/s, 절리의 수리전도도계수( $k_j$ )는 10<sup>-4</sup> m/s를 가정하였다. 이 경우  $k_j/k_r$  즉 신선암에 대한 절리의 수리전도도계수 비율로 정의된 수리전도대비(HCC: hydraulic conductivity contrast)는 10<sup>4</sup>이다. 요소의 크기가 약 2m<sup>2</sup>에서 3000m<sup>2</sup>까지 변화함에 따라 절리를 내포한 암반 요소의 수평방향 등가 수리전도도계수  $k_{xx}$ 는 암석의 수리전도도계수의 1~9.7배 범위내에서 심한 분산을 보이고 있다. 이러한 분산현상은 암반요소의 크기가 작을수록 심하게 나타났으나 암반요소의 크기가 커질수록, 즉 요소에 내포된 절리의 수가 증가하고 방향성이 다양해질수록 분산의 정도는 감소하였다. 여기에서 물성자료(properties data)의 분산이 심하다는 것은 그만큼 암반의 비균질성

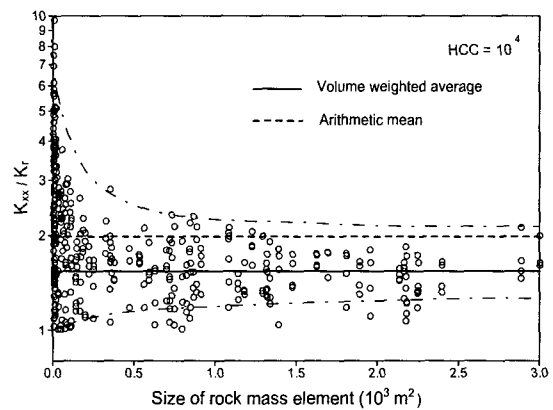


그림 2. 암반의 크기 증가에 따른 등가 수리전도도계수  $k_{xx}$ 의 변화 (수리전도대비 HCC=10<sup>4</sup>,  $k_r = 10^{-8}$  m/s)

(inhomogeneity)이 증가한다는 것을 의미한다. 즉, 주어진 암반을  $2\text{m}^2$ 의 창(window)을 단위로 관찰할 경우와  $3000\text{m}^2$ 의 창을 통해 관찰할 때를 비교하면 전자의 경우 위치에 따라 변화하는 암반 물성의 비균질성이 후자에 비해 더 심하다는 것을 뜻한다.

이 결과는 Hudson(1989)이 지적한 바와 같이 암반의 비균질성과 불연속면에 기인한 암반물성의 크기효과 또는 치수효과(scale effects)와 밀접하게 관련된 현상이다. Hudson에 의하면 암반의 크기가 대표체적(REV) 보다 작을 경우 암반물성치는 상한선과 하한선 사이에서 심한 분산(central scatter)을 보이다가 그 크기가 대표체적 보다 커지면 물성의 변화는 감소하고 분산의 중앙선을 따라 거의 일정한 값 즉 대표물성치를 갖게 된다고 제안하였다. 그림 2에서 이와 같은 대표체적을 명확히 판별해 내기는 거의 불가능하며 따라서 대표체적으로부터 대표물성치를 결정하는 순서로는 문제가 해결되지 않는다. 비균질 불연속 암반의 대표체적 자체가 모호해지는 이런 상황에서 본 연구는 직접 물성자료의 평균을 구해 이를 대표물성치로 사용하였다. 그림 2의 2개의 수평선은 445개 자료의 산술평균( $k_{xx}/k_r=2$ )과 체적가중평균( $k_{xx}/k_r=1.5$ )을 나타내며 각 암반요소의 크기를 감안한 체적가중평균  $k_{xx}=1.5$   $k_r=1.5 \times 10^{-8}$  m/s이  $HCC=10^4$ 일 때의 대표물성치로 적합함을 알 수 있다.

그림 3은 각각의 암반요소에 대해 y축(연직)방향의 등가 수리전도계수( $k_{yy}$ )를 계산하고 이를 신선암의 수리전도계수( $k_r$ )로 정규화시킨 결과로서 신선암에 대한 절리의 수리전도대비(HCC)는  $10^5$ 의 경우에 해당한다. 요소의 크기가 약  $2\text{m}^2$ 에서  $3000\text{m}^2$ 까지 변화함에 따라 절리를 내포한 암반요소의 등가 수리전도계수  $k_{yy}$ 는 암석의 수리전도계수의 최대 144배까지 증가함을 볼 수 있다.  $HCC=10^4$ 의 경우에 비해 등가물성의 분산범위는 더

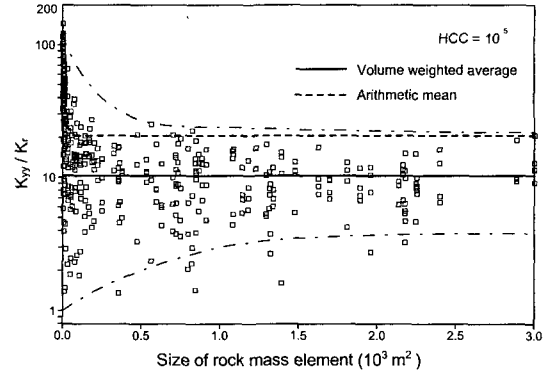


그림 3. 암반의 크기 증가에 따른 등가 수리전도 계수  $k_{yy}$ 의 변화 (수리전도대비  $HCC=10^5$ ,  $k_r=10^{-8}$  m/s)

넓게 나타났다.  $HCC=10^5$ 일 때  $k_{yy}/k_r$ 의 산술평균과 체적가중평균은 각각 21과 10으로서 체적가중평균  $k_{yy}=10$   $k_r=10^{-7}$  m/s를 REV해석의 대표물성으로 사용하였다.

그림 4는  $HCC=10^6$ 일 때 등가 수리전도계수행렬의 비대각선 성분인  $k_{xy}$ 값의 분포를 나타낸다. 커플링 효과를 발생시키는 이  $k_{xy}$ 값은 암반요소의 크기가 약  $2\text{m}^2$ 일 때 가장 심한 분산( $-5.4 \times 10^{-6}$  m/s ~  $7.6 \times 10^{-6}$  m/s)을 보였으며 암반요소의 크기가 증가함에 따라 분산은 급격히 감소하면서 커플링 효과도 사라지는 결과를 보여주고 있다.

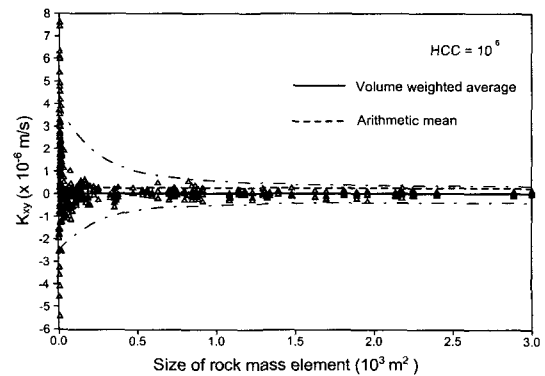


그림 4. 암반의 크기 증가에 따른 등가 수리전도 계수  $k_{xy}$ 의 변화 (수리전도대비  $HCC=10^6$ ,  $k_r=10^{-8}$  m/s)

표 1. HCC값의 변화에 따른 등가 수리전도계수  $k_{xx}$ ,  $k_{yy}$ ,  $k_{xy}$ 의 체적 가중 평균값 ( $HCC = k_j/k_r$ ,  $k_r = 10^{-8} \text{m/s}$ )

HCC	$10^4$	$10^5$	$10^6$
$k_{xx} / k_r$	1.5	6.4	54.9
$k_{yy} / k_r$	1.9	10.0	94.3
$k_{xy} (10^{-8} \text{m/s})$	0.02	0.24	2.0

그림 4에서 수평선으로 표시된 산술평균과 체적 가중평균은 각각  $0.27 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 와  $0.02 \times 10^{-6} \text{m/s}$ 이다.

이상 3가지 HCC 값에 대한 등가 수리전도계수의 체적가중 평균값을 정리하면 표 1과 같다.

REV해석에서는 앞서 설명한 등가 수리전도계수의 체적가중평균을 556개 유한요소 모두에 균일하게 부여한 후 2차원 유한요소 유동해석을 수행하였다. 한편 non-REV해석에서는 앞서 그림들에 도시된 445개 암반요소의 등가 수리전도계수 데이터를 해당 요소에 개별적으로 부여한 후 2차원 유동해석을 수행하였다. REV해석과 non-REV해석 공히 신선암의 수리전도계수는  $k_{xx} = k_{yy} = 10^{-8} \text{m/s}$ 로 고정하고 커플링 성분  $k_{xy}$ 는 무시하였으며 수리전도대비 HCC값은  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ 의 3가지 경우를 시험하였다. 공동의 직경 또한 10m, 30m, 50m의 3가지 경우를 시험하였다. 사용된 프로그램은 Segerlind의 2차원 유체유동 및 열전달 해석 전용프로그램인 TDFIELD를 사용하였다(Segerlind, 1984).

그림 5는  $HCC = 10^5$ , 공동의 직경 10m와 30m일 경우 절리의 수를 600개에서 1800개로 증가시킬 때 REV해석과 non-REV해석으로부터 얻어진 지하수 유입량을 비교한 것이다. 그림 6은 REV해석과 non-REV해석으로부터 얻어진 지하수 유입량을 공동의 직경 10m와 50m에 대해 비교한 그림이다.

REV해석 결과 지하수 유입량은 암반에 분포하는 절리의 수(이는 단위면적당 포함된 절리의 수 즉 '절리밀도' 로도 표현할 수 있음)가 증가함에

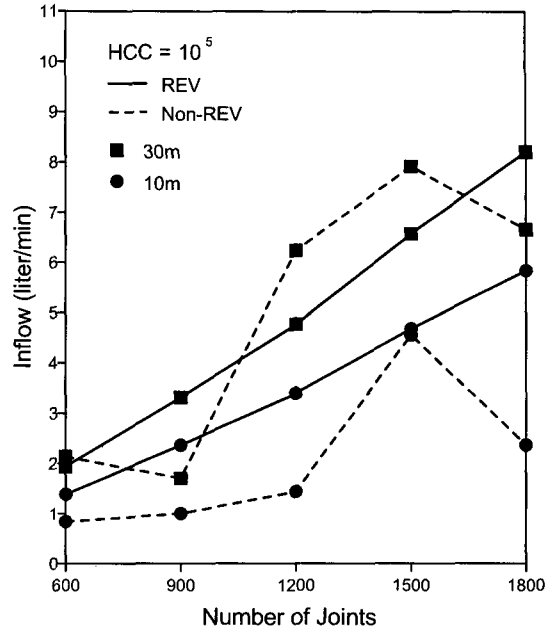


그림 5. 절리의 수 증가에 따른 REV와 non-REV 해석의 지하수 유입량 비교 (공동의 직경 10m와 30m 비교)

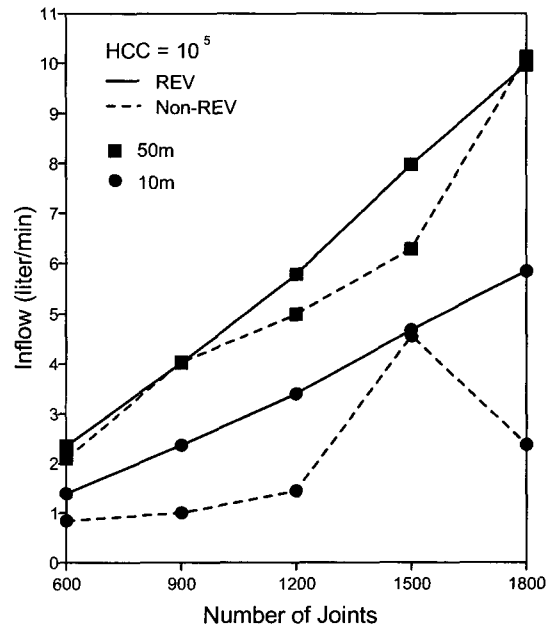


그림 6. 절리의 수 증가에 따른 REV와 non-REV 해석의 지하수 유입량 비교 (공동의 직경 10m와 50m 비교)



따라 일관된 증가 추세를 보여주고 있다. 즉  $HCC = 10^5$ 일 경우, 심도 250m에 위치한 원형공동에 있어서 암반의 절리밀도가 2배 증가하면 유입량은 2.5배로 증가하였고 절리밀도가 3배 증가할 경우 유입량은 약 4배로 증가하였다. 이는 3가지 공동 직경 10m, 30m, 50m에 공히 나타난 결과로서 다음과 같이 재정리할 수 있다. “굴착 심도 및 지하수위의 위치에 변화가 없는 한, 공동의 크기에 관계없이 암반의 절리밀도가 2배와 3배로 증가하면 지하수 유입량은 각각 2.5배와 4배로 증가한다.” 또한 5개 절리암반(절리의 수 600, 900, 1200, 1500, 1800개) 모두에서 공동의 직경이 3배 증가(공동의 단면적은 9배 증가)하면 유입량은 1.4배로 증가하였고 직경이 5배 증가(공동 단면적은 25배 증가)하면 유입량은 1.7배로 증가하였다. 이 결과를 다시 정리하면 다음과 같다. “굴착 심도 및 지하수위의 위치에 변화가 없는 한, 암반의 절리밀도에 관계없이 굴착공동의 직경이 3배와 5배(또는 굴착 단면적이 9배와 25배)로 증가하면 침투유량은 각각 1.4배와 1.7배로 증가한다.”

이상의 REV해석 결과와는 대조적으로 non-REV해석으로부터 얻어진 지하수 유입량의 변화 양상은 매우 불규칙적이다. 절리밀도가 증가하더라도 유입량은 오히려 감소하는 경우도 발견되었으며 유입량의 증가 추세 또한 일관된 경향을 보이지 않았다. 이러한 결과는 각각의 요소에 부여된 수리전도성이 그 요소에 내포된 절리의 수와 방향에 따라 달라짐으로써 비균질 이방성 요소망이 형성되었고 특히 공동 주변에 위치한 요소들중 절리를 포함하지 않는 신선암 요소들(intact rock elements)에 의해 지하수 유입이 억제되는 현상이 발생하였기 때문으로 해석된다. Non-REV해석과 같이 암반의 비균질성을 요소 단위(element base)로 고려할 경우와 REV해석처럼 암반을 균질체로 간주할 경우, 발생하는 유입량이 달라지는 것은 당연한 결과라고 할 수 있다. 그림 6에서 보듯이

이 차이는 직경 10m의 공동에서 가장 심했고(최대 3.5 liter/min), 공동의 직경이 50m로 증가하면서 상당히 감소하였다(최대 1.7 liter/min). 이와 같이 REV해석 결과가 non-REV해석 결과에 근접한다는 것은 REV해석에 사용된 물성치가 대상 암반의 실질적 대표물성치에 근접했다는 것을 나타낸다. 이는 대표체적 또는 대표물성의 개념이 성립하기 위한 두가지 조건 즉, (1)절리의 기하학적 분포상태가 규칙적이고 반복적이던가 아니면 완전히 무작위적이어야 하고 (2)공동의 폭과 높이 등과 같은 굴착의 특성치수(characteristic length)가 절리간격 보다 훨씬 커야 한다는 조건중 두번째 조건을 만족시키기 때문인 것으로 해석된다.

#### 4. 절리망 해석

절리망 해석은 암반에 분포하는 절리들중 지하수 유로를 형성하는 절리들만 선별하여 유동해석을 수행하는 기법으로서 개별요소법과 대응되는 방법이라 할 수 있다. 이 방법은 절리의 영향을 가장 직접적으로 반영할 수는 있으나 신선암에서는 전혀 유동이 일어나지 않는다는 제한사항이 있다. 절리망 해석의 순서는 다음과 같이 요약할 수 있다. 암반에 분포하는 모든 절리(또는 절리군)들에 대한 기하학적 분포자료가 수집되면 절리발생 프로그램인 JMAP을 이용하여 절리도를 구성하고, 연결성 시험 프로그램인 CONNECT를 통해 고립된 절리나 막다른 절리 등을 제외시킨 후 상호 연결된 절리들만으로 절리망을 구성한다(송명규, 1993). 절리망을 통한 유동해석은 다음 식들을 이용하여 절리 교차점(또는 절점)에서의 수두를 계산하고 절점 간의 수두차와 절리의 수리전도도(hydraulic conductance)로부터 유량을 계산한다.

$$h_i = \frac{\sum_j C_{ij} h_j}{\sum_j C_{ij}} \quad (7)$$

$$Q_{ij} = C_{ij} \Delta h_{ij} \quad (8)$$

여기서 하부점자  $i$ 와  $j$ 는 절점번호,  $h_i$ 와  $h_j$ 는  $i$  절점에서 수두,  $\Delta h_{ij}$ 는  $i$   $j$  절점간의 수두차,  $Q_{ij}$ 는  $i$   $j$  절점간의 유량,  $C_{ij}$ 는  $i$   $j$  절점간의 수리전도도로서 다음과 같이 표현된다.

$$C_{ij} = \frac{\gamma e^3}{12\mu L_{ij}} \quad (9)$$

여기서  $\gamma$ 는 물의 단위중량,  $e$ 는 절리의 수리간극 (hydraulic aperture),  $\mu$ 는 물의 점성계수,  $L_{ij}$ 는  $i$   $j$  절점간의 거리이다. 절리의 수와 절리간의 교차점의 수가 매우 커질 경우, 식(7)의 해를 구하는 방법으로는 sparse matrix solving method가 효율적이다. 본 절리망 해석에는 모델의 상부경계를 지표면과 지하수위의 위치로 간주하였고, 좌우측 및 하부 경계면은 수두경계조건을 사용하였고, 굴착 경계에는 대기압이 작용한다고 가정하였다. 또한, 절리의 수리간극은 절리벽면의 거칠기와 접촉상태 등을 감안하여 기계적 간극의 1/10인 100 $\mu$ m으로 가정하였다.

그림 7은  $HCC=10^4$ 이고 공동의 직경이 10m일 때 REV, non-REV 및 절리망 해석 결과 얻어진 지하수 유입량을 상호 비교한 것이다. 절리밀도가 증가하면서 일관된 유입량의 증가 추세를 보이는 REV해석, 절리암반의 비균질성에 의해 유입량이 불규칙하게 변화하는 non-REV해석 결과 등은 그림 5에 나타난 경향과 일치한다. 이와는 대조적으로 절리망 해석에서는 절리의 수가 600개와 900개 일 때 공동으로의 지하수 유입은 전혀 발생하지 않았다. 이는 굴착된 원형공동 경계에 절리망이 교차하지 않았다는 것을 의미한다. 이 결과는 절리망 해석이 개별절리와 공동의 위치에 얼마나 민감하게 반응하는지를 보여주는 대표적인 예이다. 반대로 REV해석은 절리암반을 균질체로 간주한 결과이기 때문에 공동의 위치에 무관하며 절리의

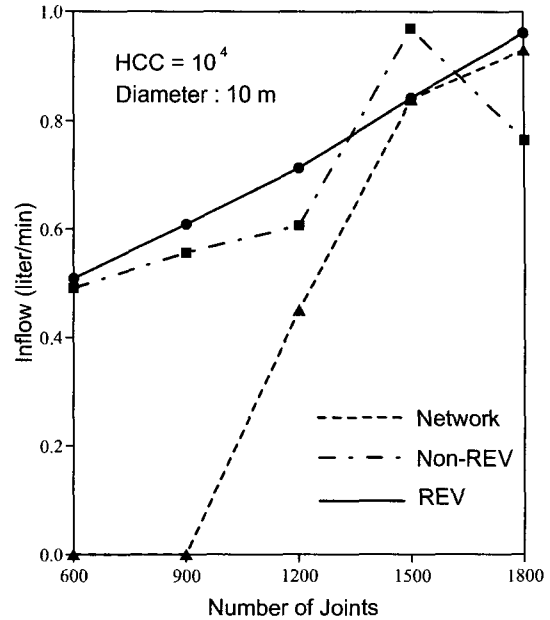


그림 7. REV, non-REV 및 절리망 해석법에 의한 지하수 유입량 비교 (공동의 직경 10m)

위치의 해석에 전혀 영향을 미치지 않는다. 따라서 non-REV해석과 절리망 해석 결과를 REV해석 결과와 비교함으로써 암반의 비균질성에 의해 유입량 예측이 얼마나 달라질 수 있는지 판단할 수 있다.

공동의 직경이 10m일 때의 결과인 그림 7에 의하면 REV해석을 기준으로 non-REV해석은 최대  $\pm 20\%$ 의 유입량 예측 오차를 보였으며 절리망 해석은 지하수 유입 유무의 판단까지 달라지는 결과 ( $-100\%$  오차)를 초래하였다. 그림 8은 공동의 직경이 30m일 때 얻어진 결과로서 REV해석을 기준으로 non-REV해석은 최대  $\pm 20\%$ , 절리망 해석은 최대  $\pm 70\%$ 의 유입량 예측 오차를 보였다. 그림 9는 공동의 직경이 50m로 증가했을 경우 3가지 해석 결과를 비교한 것이다. REV해석을 기준으로 유입량 예측 오차는 non-REV해석에서 최대  $\pm 5\%$ , 절리망 해석에서 최대  $\pm 50\%$ 가 발생하였다.

$HCC=10^4$ 이 공동으로 적용된 그림 7, 그림 8,

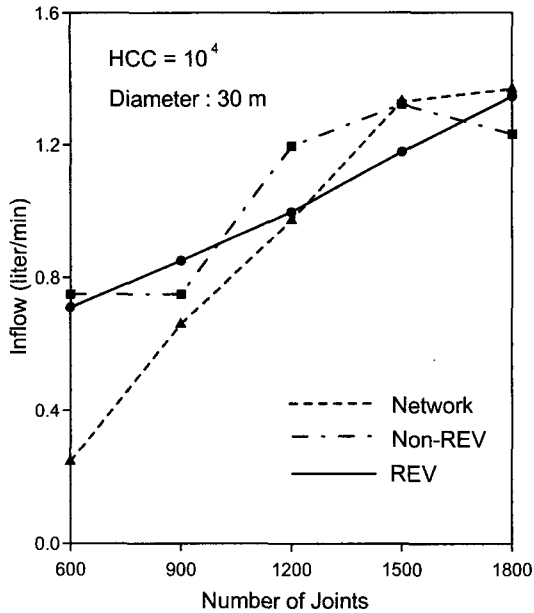


그림 8. REV, non-REV 및 절리망 해석법에 의한 지하수 유입량 비교 (공동의 직경 30m)

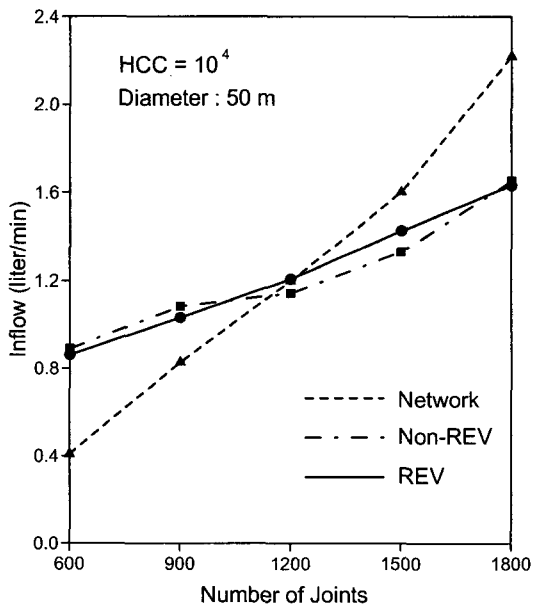


그림 9. REV, non-REV 및 절리망 해석법에 의한 지하수 유입량 비교 (공동의 직경 50m)

그림 9의 REV 해석 결과만을 분석하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 굴착 심도 및 지하수위의 위치에 변화가 없는 한, 공동의 크기에 관계없이 암반의 절리밀도가 2배와 3배로 증가하면 지하수 유입량은 각각 1.5배와 2배로 증가한다. 또한, 굴착 심도 및 지하수위의 위치에 변화가 없는 한, 암반의 절리밀도에 관계없이 굴착공동의 직경이 3배와 5배(또는 굴착 단면적이 9배와 25배)로 증가하면 침투유량은 각각 1.4배와 1.7배로 증가한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 절리암반내에서 발생하는 지하수 유동 및 굴착된 지하공동 내부로의 지하수 유입량을 예측하는 3가지 방법 즉 대표체적법(REV), 비대표체적법(non-REV) 및 절리망 해석법을 비교 연구하였다. 대표체적법과 비대표체적법을 수행하기 위한 선처리 과정으로서 다수의 절리가 임의의 교차각을 갖고 서로 교차하는 절리암반의 등가 수리전도계수행렬을 산정하는 이론과 계산 절차(일명 순차적 해석)를 소개하였다.

한편 500m의 정방형 영역에 절리밀도를 달리 하는 암반모델 5개를 설정하고 REV와 non-REV 개념에 근거한 2차원 유한요소 유동해석을 수행하였다. 2m<sup>2</sup>에서 3000m<sup>2</sup>까지 다양한 크기를 가진 556개 유한요소중 절리를 내포한 445개 요소에 대해 순차적 해석을 적용하여 등가 수리전도계수들을 산정하였다. REV해석에서는 등가 수리전도계수의 체적가중평균을 대표물성치로 사용함으로써 절리암반의 이방성은 유지되었으나 비균질성은 무시되었다. Non-REV해석에서는 각 요소의 등가 수리전도계수를 요소물성으로 사용함으로써 암반의 이방성과 비균질성 모두 유동해석에 반영되었다. 한편 절리망 해석에서는 절리도로부터 연결된 절리망을 구현하고 절리의 개별적 위치와 방향성을 직접 해석에 반영하였다.

절리암반의 중앙(심도 250m)에 위치한 원형공동의 직경을 10m, 30m, 50m로 증가시키면서 발생하는 지하수 유입량을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) REV해석에서 지하수 유입량은 암반의 절리밀도, 공동의 크기 및 절리와 신선암의 수리전도대비가 증가함에 따라 일관성있게 증가하는 추세를 보였다. 즉, 절리밀도가 2~3배로 증가하면 유입량은 1.5~4배까지 증가하였으며 공동의 직경이 3~5배(굴착 단면적 9~25배)로 증가하면 유입량은 1.4~1.7배로 증가하였다.
- 2) Non-REV해석은 요소망의 비균질성으로 인해 REV결과로부터 평균  $\pm 20\%$ 까지 요동(fluctuate)하는 경향을 보였으나 공동의 직경이 증가하면서 오차는  $\pm 5\%$ 로 감소하였다.
- 3) 절리망 해석은 절리밀도, 공동의 크기, 절리망과 공동의 교차여부 등에 가장 민감하게 반응하였으며 REV결과와 가장 큰 편차( $\pm 50\%$ ~침투유량 유무)를 보였다.

결론적으로 절리망 해석은 개별절리의 영향이 가장 직접적으로 반영된다는 장점이 있음에도 그 신뢰도는 절리들의 개별적 위치와 방향에 전적으로 의존할 수밖에 없는 맹점을 갖고 있다. 현실적으로 암반에 분포하는 각종 불연속면들에 관한 자료가 완벽한 수준에 이르지 못할 뿐만 아니라 현장에서 수집된 자료에도 불확실성이 상존한다는

사실을 감안할 때 암반 전체를 균질화(homogenization)시킨 대표체적법과 요소 단위로 균질화 과정을 밟는 비대표체적법이 더 효율적이며 합리적인 해석기법이 될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 문현구, 주광수(1991), "등방 및 이방성 암반내 공동의 열역학적 거동에 관한 전산모델연구", 한국암반역학회지, 제1권, 제2호, pp.181~203.
2. 송명규(1993), "불연속 암반의 수리전도특성과 암석절리에서의 유체유동에 관한 수치해석적 연구", 석사학위논문, 한양대학교, p.66.
3. Grabinsky, M.W.F. & Curran, J.H.(1993), "Efficient Mesh Generation Procedures for Finite Element Analysis of Underground Structures", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.30, pp.591~600.
4. Hudson, J.A.(1989), Rock Mechanics Principles in Engineering Practice, CIRIA Ground Engineering Report: Underground Construction, Butterworths, London, p.72.
5. Moon, H. & Kim, C.(1993), "Scale Effects in the Elastic Moduli and Strength of Jointed Rock Masses", Proc. of the 2nd International Workshop on Scale Effects, Pinto da Cunha, A., ed., Lisbon, pp.39~48.
6. Pariseau, W.G.(1994), "Equivalent Properties of Porous, Jointed Rock", Proc. of the 8th International Conference on Computer Methods and Advances in Geomechanics, Siriwardane, H.J. & Zaman, M.M. eds., West Virginia, Vol.3, pp.2259~2264.

(접수일자 1999. 5. 19)